

ロボットの移動を考慮した走査型LIDARのため環境マップ補正アルゴリズムの開発

著者	堀地 恒生
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	59
ページ	1-7
発行年	2018-03-31
URL	http://doi.org/10.15002/00021615

ロボットの移動を考慮した走査型 LIDAR のための 環境マップ補正アルゴリズムの開発

A DEVELOPMENT OF ACCURATE ENVIRONMENT MAP BUILDING ALGORITHM FOR MOBILE ROBOTS
IN MOTION BY APPLYING ROTATIONAL SCANNING LIDAR

堀地恒生

Kosei HORICHI

指導教員 小林一行 教授

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻修士課程

Light Detection and Ranging (LIDAR) is a popular sensing device for outdoor mobile robot navigation. LIDAR can measure the r-theta coordinates of distance at approximately centimeter order accuracy. However, to build an environment map using LIDAR, we must consider the effects of both the translational and rotational speed of the mobile robot, especially at relatively high speeds. In this paper, we describe a spot-based accurate environment map building algorithm that considers the effects of the robot's movement. The basic idea of the proposed spot-based accurate environment map building algorithm is formulated and described by applying three different rotational scanning LIDAR methods. Based on the simulations and experiments, we confirm the validity of the proposed algorithm.

Key Words: spot-based, environment map, LIDAR, mobile robot

1. はじめに

移動ロボットの分野において、精度の高い環境マップ生成は、もっとも重要なプロセスの一つである。精度の高い環境マップを用いることで、移動ロボットの正確に自己位置を推定でき、安全かつ高速なナビゲーションを行うことができる。

環境マップを生成するために LIDAR と呼ばれる測域センサがよく用いられる。LIDAR は、レーザをスポットごとに順番に放射状に照射し、障害物までの距離を $r-\theta$ 座標で測定できる。

一般的に LIDAR は、回転走査システムを採用している。レーザを回転走査させるので、1 スキャンの間で、 $r-\theta$ 距離情報を取得する時間がスポットごとに異なる。

ほとんどの研究は、移動ロボットが静止していると仮定して、スキャンごとの、LIDAR の取得した $r-\theta$ 距離情報とオドメトリを用いて環境マップを生成している。これらのスキャンベースの環境マップ生成アルゴリズムの結果は、移動ロボットの動きと比べて LIDAR のスキャン速度が十分に速い場合に有意な結果を得られる[1]-[3]。しかし、LIDAR のスキャン速度に比べ、移動ロボットの速度が比較的速い場合、1 スキャンの間の移動ロボットの動きの影響を無視できなくなり、環境マップが歪んでしまう。

Fig.1 は、1 スキャンの間の移動ロボットの動きの影響

を受けて、環境マップが歪んでいる様子を示している。この影響は、特に移動ロボットの回転時に大きく生じる。

環境マップの歪みの対処方法として、1 スキャンの間の移動ロボットの動きによる誤差を軽減するために、距離情報をグリッド化する方法がある[4]-[5]。しかし、この方法では、環境マップの解像度を低くしてしまう。このような低解像度化を防ぐためには、従来のスキャンベースでの環境マップ生成ではなく、スポットをベースとした環境マップ生成を行うことが重要である。

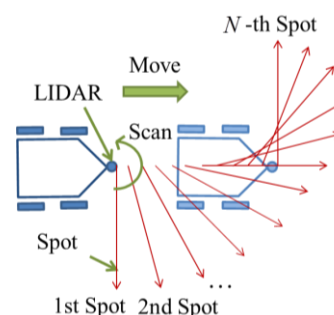


Fig.1 Relationship between a scan and spots when the mobile robot is moving forward

そこで本研究では、LIDAR の 1 スキャンの間の移動ロボットの動きを考慮した、LIDAR のスポットベースの環境マップ生成アルゴリズムの開発を目的とする。

今回提案したスポットベースの環境マップ生成アルゴリズムは、スキャン方法の異なる様々なタイプの LIDAR に応用できるか確かめる。

提案したスポットベースの環境マップ生成アルゴリズムの有効性を、シミュレーション実験と実機実験により検証する。

2. 提案手法のためのパラメータ定義

本研究は、3つのタイプの回転走査システムの LIDAR に提案手法を適用する。移動ロボットの動きの影響を考慮するため、変数と定数を以下に定義する。

[変数と定数]

$i \in \mathbf{N}$: スポット番号 ($i=1, \dots$)

$k \in \mathbf{N}$: スキャン番号 ($k=1, \dots$)

$j \in \mathbf{N}$: k スキャン目のスポット番号 ($j=1, \dots, N$)

$N \in \mathbf{N}$: 1 スキャンあたりのスポット総数

$\Delta t \in \mathbf{R}$: スポットごとのサンプリング時間

$\theta(j) \in \mathbf{R}$: ローカル x-y 座標における水平方向のスキャン角度

$\psi(j) \in \mathbf{R}$: ローカル x-y-z 座標における垂直方向のスキャン角度

${}^L\mathbf{R}_{(\theta, \psi)}(j) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$: LIDAR のスポット方向を表す回転行列

${}^L\mathbf{T}_{(x,y,z)} \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$: 移動ロボットの回転軸からみた LIDAR の相対位置

[LIDAR のための変数]

$r(i) \in \mathbf{R}$: r- θ 座標における距離情報

${}^L\mathbf{X}(i) \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$: ローカル x-y 座標における距離情報

${}^G\mathbf{X}(i) \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$: グローバル x-y 座標における距離情報

[移動ロボットのための変数と定数]

$v(k) \in \mathbf{R}$: 移動ロボットの並進速度

$\varphi(k) \in \mathbf{R}$: k スキャン目の 1 スポット目を照射する直前のグローバル x-y 座標における移動ロボットの進行角度

$\omega(k) \in \mathbf{R}$: 移動ロボットの角速度

$\Delta\varphi(k) \in \mathbf{R}$: スポットごとの移動ロボットの進行角度の変化量

${}^G\mathbf{R}(i) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$: 移動ロボットの進行角度の回転行列

${}^G\mathbf{T}(i) \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$: 移動ロボットの並進ベクトル

$\Delta\mathbf{R}(i) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$: $i-1$ から i までの移動ロボットの進行角度の変化量の回転行列

$\Delta\mathbf{T}(i) \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$: $i-1$ から i までの移動ロボットの並進移動の変化量の並進ベクトル

提案したスポットベースの環境マップ生成アルゴリズムにおいて、スキャン番号 k と k スキャン目のスポット番号 j は、スポット番号 i と 1 スキャンあたりのスポット総数 N を用いることで、つぎのように定義できる。

$$k = \text{floor}((i-1)/N) + 1 \quad (1)$$

$$j = \text{mod}(i-1, N) + 1 \quad (2)$$

環境マップの生成には、LIDAR の r- θ 距離情報と移動ロボットのオドメトリを使用する。そこで、ローカル x-y 座標とグローバル x-y 座標における、LIDAR と移動ロボットの関係を定義する。

Fig.2 は、ローカル x-y 座標における LIDAR の測定した距離情報を定義する。また、Fig.3 は、グローバル x-y 座標における移動ロボットのオドメトリと LIDAR の測定した距離情報の関係を定義する。

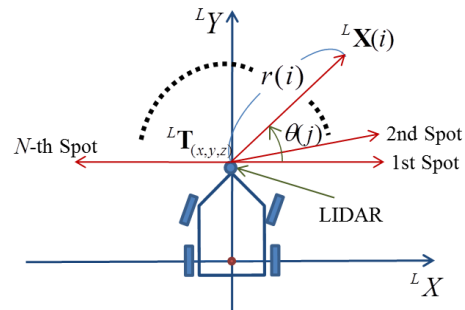


Fig.2 Relationship between local mobile robot and LIDAR r- θ coordinates

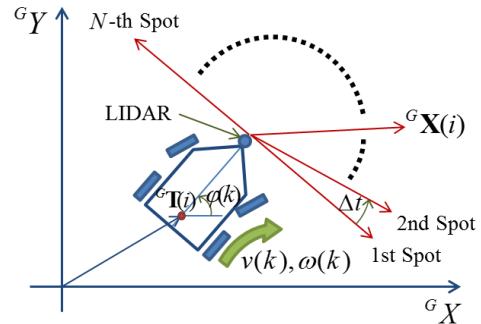


Fig.3 Relationship between LIDAR coordinate and global coordinates of the mobile robot

Fig.4 から Fig.6 は一般的な 2D LIDAR と複数レーザ式 3D LIDAR, 振動式 3D LIDAR を示している。

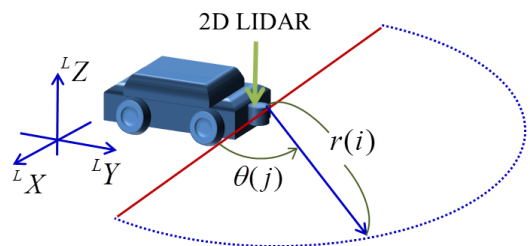


Fig.4 2D rotational scanning LIDAR

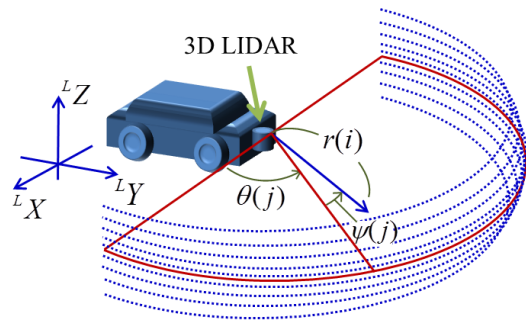


Fig.5 3D rotational multiple beams scanning LIDAR

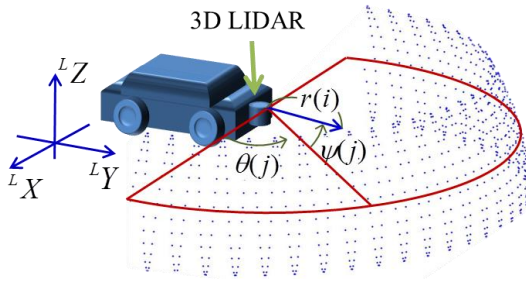


Fig.6 3D rotational oscillated scanning LIDAR

Fig.4は移動ロボットの正面に設置された2D LIDARを示す。回転走査システムによって、反時計回りに回転し、スポットごとに距離を測定する。

Fig.5は、複数レーザ式3D LIDARを示す。複数レーザを使用する3D LIDARは、精密なキャリブレーションを必要とし、コストがかかる。

Fig.6は、振動式3D LIDARを示す。1つのレーザを振動させて測定しているため、複数レーザ式に比べ、解像度が低い。

Fig.7からFig.9は、右にカーブ走行している時の移動ロボットに、スキャンベースの環境マップの生成アルゴリズムを適用したときの生成した障害物までの距離情報の例を示す。

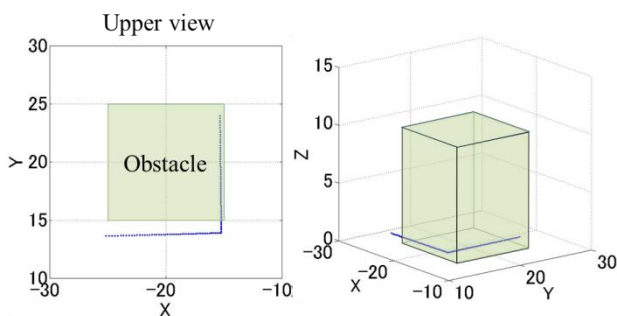


Fig.7 Obstacle detection with 2D rotational scanning LIDAR

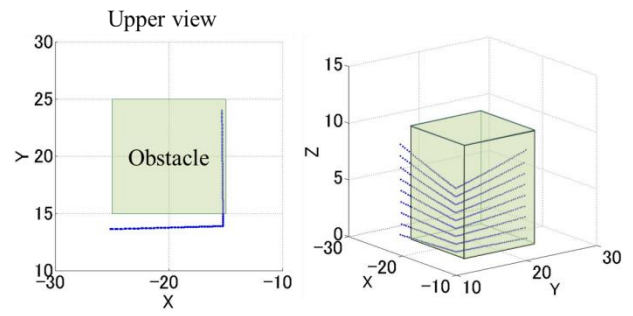


Fig.8 Obstacle detection with 3D rotational multiple beams scanning LIDAR

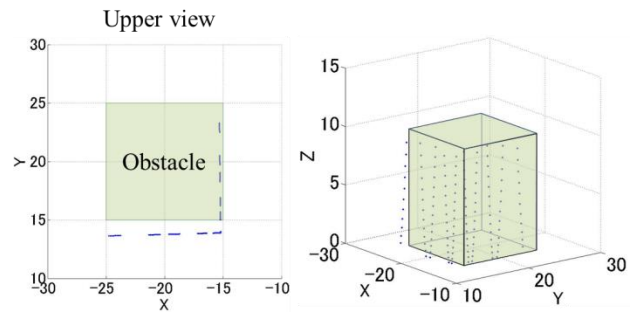


Fig.9 Obstacle detection with 3D rotational oscillated scanning LIDAR

Fig.7は2D LIDARで測定した距離情報を示す。移動ロボットの動きの影響を受けて、障害物情報が歪んでいる。

Fig.8は、複数レーザ式3D LIDARで測定した距離情報を示す。2D LIDARと同じように、移動ロボットの動きの影響を受けて、障害物情報が歪んでいる。

Fig.9は、振動式3D LIDARで測定した距離情報を示す。解像度が低いため、点線のように表示されている。ほかのタイプのLIDARと同様に、移動ロボットの動きの影響を受けて、障害物情報が歪んでいる。

3. 移動ロボットの構成

移動ロボットは、Fig.10の二輪駆動ロボットを使用する。スキャン方法の異なる3つのタイプのLIDARを搭載し、ジャイロスコプや速度計を用いて、それぞれのLIDARごとに環境地図の生成を行う。

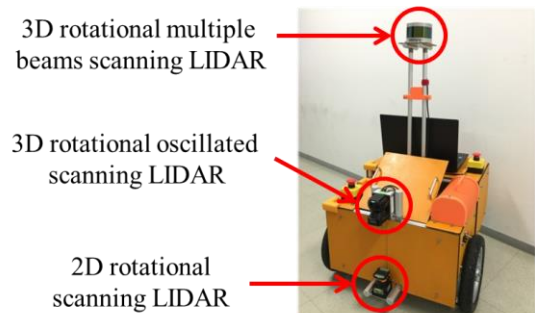


Fig.10 The mobile robot

4. 仮定と問題

移動ロボットの動きの変化に関係なく、精度の高い環境マップを生成するために、以下に仮定を設ける。

A) 移動ロボットの速度は、LIDAR の1スキャンの間、一定である。

上記の仮定をもとにスポットベースの環境マップ生成アルゴリズムを考え、以下に問題を提起する。

P) LIDAR のスポットをベースとして環境マップ生成するために、どのようにして r- θ 距離情報とオドメトリを融合するか。

5. 提案する環境マップ補正アルゴリズム

Fig.11 に、スポットベースの環境マップ生成アルゴリズムのブロック線図を示す。

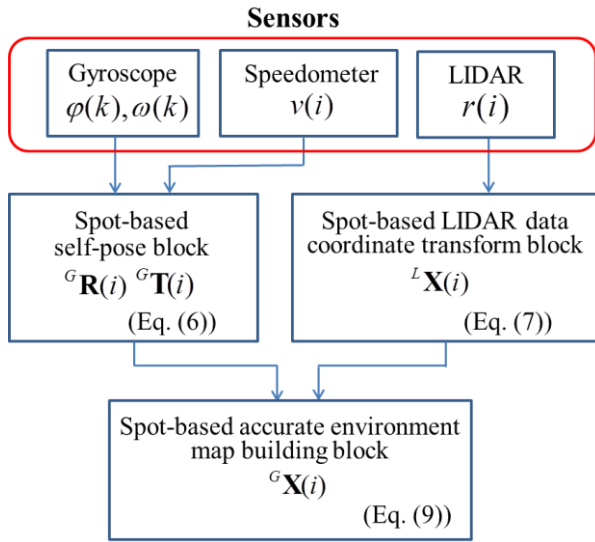


Fig.11 Block diagram of the proposed spot-based accurate environment map building algorithm

提案したスポットベースの環境マップ生成アルゴリズムは、3つのコンポーネントから構成されている。

- スポットベースの自己位置推定ブロック (1)
- スポットベースの LIDAR データ座標変換ブロック (2)
- スポットベースの環境マップ生成ブロック (3)

(1) スポットベースの自己位置推定

Fig.11 で示すように、ジャイロスコープから取得した移動ロボットの角度・角速度情報 $\varphi(k), \omega(k)$ と、速度計から取得した並進速度情報 $v(k)$ を用いて、移動ロボットの自己位置を推定する。

グローバル x-y 座標におけるスポット番号 $i-1$ から i までの、移動ロボットの進行角度の変化量の回転行列 $\Delta\mathbf{R}(i)$ と移動量の並進ベクトル $\Delta\mathbf{T}(i)$ は、以下のように表す。

$$\Delta\mathbf{R}(i) = \exp \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times \Delta\varphi(k) \right) \quad (3)$$

$$\Delta\mathbf{T}(i) = \begin{bmatrix} \Delta t \cdot v(k) \cdot \cos(\varphi(k) + j \cdot \Delta\varphi(k)) \\ \Delta t \cdot v(k) \cdot \sin(\varphi(k) + j \cdot \Delta\varphi(k)) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Eqs.(3),(4)に示すスポットごとの移動ロボットの進行角度の変化量 $\Delta\varphi(k)$ は、以下のように定義する。

$$\Delta\varphi(k) = \Delta t \cdot \omega(k) \quad (5)$$

グローバル x-y 座標における移動ロボットの回転行列 ${}^G\mathbf{R}(i)$ と並進ベクトル ${}^G\mathbf{T}(i)$ は、以下のように Eqs.(3),(4) を用いた同時変換行列の直積で定義できる。

$$\begin{bmatrix} {}^G\mathbf{R}(i) & {}^G\mathbf{T}(i) \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = \prod_{n=1}^i \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{R}(n) & \Delta\mathbf{T}(n) \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

(2) スポットベースの LIDAR データ座標変換

LIDAR から取得したスポット番号 i の r- θ 距離情報 $r(i)$ をローカル x-y 座標における距離情報 ${}^L\mathbf{X}(i)$ に変換する。

LIDAR のスポット方向を表す回転行列 ${}^L\mathbf{R}_{(\theta,\psi)}(j)$ と移動ロボットの回転軸からみた LIDAR の相対位置 ${}^L\mathbf{T}_{(x,y,z)}$ を用いて、x-y 座標における距離情報 ${}^L\mathbf{X}(i)$ を以下のように求める。

$$\begin{bmatrix} {}^L\mathbf{X}(i) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^L\mathbf{R}_{(\theta,\psi)}(j) & {}^L\mathbf{T}_{(x,y,z)} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r(i) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Eq.(7)に示す LIDAR のスポット方向を表す回転行列 ${}^L\mathbf{R}_{(\theta,\psi)}(j)$ は、以下のように定義する。

$${}^L\mathbf{R}_{(\theta,\psi)}(j) = \exp \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times \theta(j) \right) \cdot \exp \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \psi(j) \right) \quad (8)$$

$\theta(j)$ と $\psi(j)$ $\{j=1, \Lambda, N\}$ は定数であり、使用する LIDAR のパラメータによって決まる。

(3) スポットベースの環境マップ生成

Eq.(6)で求めたグローバル x-y 座標における移動ロボットの移動情報 (${}^G\mathbf{R}(i), {}^G\mathbf{T}(i)$) と、ローカル x-y 座標におけるスポットごとの距離情報 ${}^L\mathbf{X}(i)$ を用いて、グロー

バル x-y 座標におけるスポットごとの環境マップ ${}^G\mathbf{X}(i)$ を以下のように求める.

$$\begin{bmatrix} {}^G\mathbf{X}(i) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^G\mathbf{R}(i) & {}^G\mathbf{T}(i) \\ \mathbf{O} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} {}^L\mathbf{X}(i) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

6. シミュレーション実験

今回提案したスポットベースの環境マップ生成アルゴリズムの有効性を環境マップ生成シミュレーションで検証した.

移動ロボットの動きの影響を比較するために, 一般的に使用されている3つのLIDARのパラメータを適用する (Table 1). 具体的には, 2D LIDAR は北陽電気株式会社製の UTM-30LX, 複数レーザ式 3D LIDAR は Velodyne 社製の VLP-16, 振動式 3D LIDAR は北陽電気株式会社製の YVT-X002 のパラメータを用いる.

Fig.12 に示すように, グローバル x-y-z 座標において $[-15, 15, 0]^T$ と $[15, 15, 0]^T$ に, 大きさ $[1, 1, 10]^T$ の直方体のランドマークとなる障害物を2つ設置する. 移動ロボットは右回り1回転, 左回り1回転の8の次走行する (Table 2).

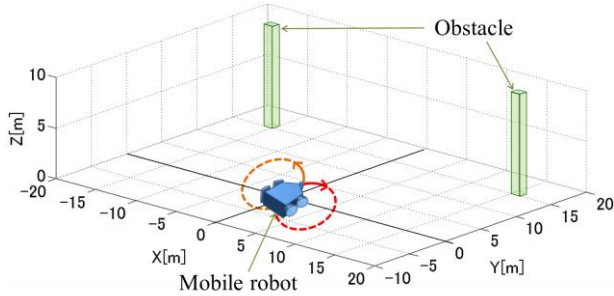


Fig.12 Test environment

Table 1 Parameters for the LIDARs

	2D rotational scanning LIDAR (UTM-30LX)	3D rotational multiple beams scanning LIDAR (VLP-16)	3D rotational oscillated scanning LIDAR (YVT-X002)
Spot sequence number per single scan [spot]	1081	28800	2100
Scan time[s]	0.025	0.1	0.05
Horizontal detection range [deg]	-30 to 210	0 to 360	-15 to 195
Vertical detection range [deg]	0	-15 to 15	-5 to 35

Table 2 Parameters for the mobile robot

Moving speed : $v(k)$ [m/s]	1
Initial direction angle : $\varphi(0)$ [rad]	$\pi/2$
Angular velocity : $\omega(k)$ [rad/s]	2
Translation vector for the LIDAR position gap from the mobile robot position : ${}^L\mathbf{T}_{(x,y,z)}$ [m]	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

Fig.13 から Fig.15 は, 2D LIDAR と複数レーザ式 3D LIDAR, 振動式 3D LIDAR に, スポットベースの環境マップ生成アルゴリズムを適用したときの環境マップ生成シミュレーションの結果を示す. また, 比較のために, 従来のスキャンベース環境マップ生成アルゴリズムを適用したときの環境マップシミュレーションの結果も示す.

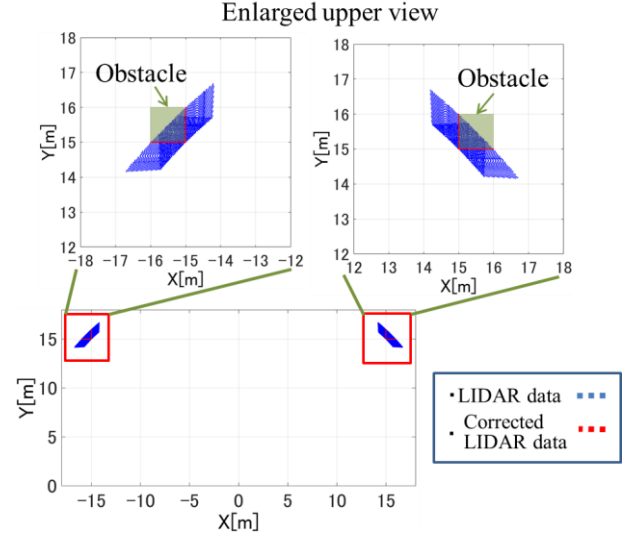


Fig.13 Comparison of proposed spot-based algorithm and conventional scan-based algorithm for 2D rotational scanning LIDAR

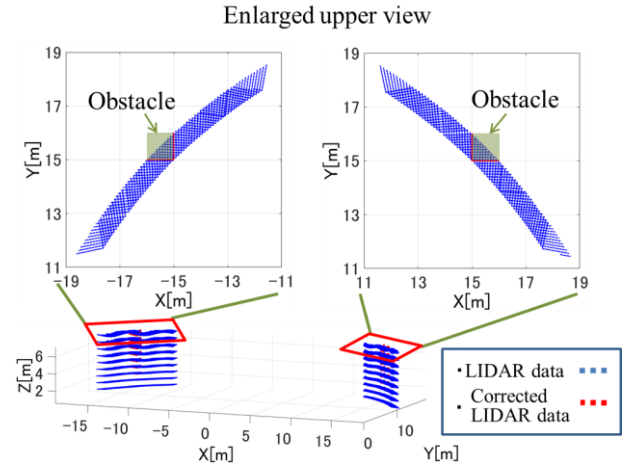


Fig.14 Comparison of proposed spot-based algorithm and conventional scan-based algorithm for 3D rotational multiple beams scanning LIDAR

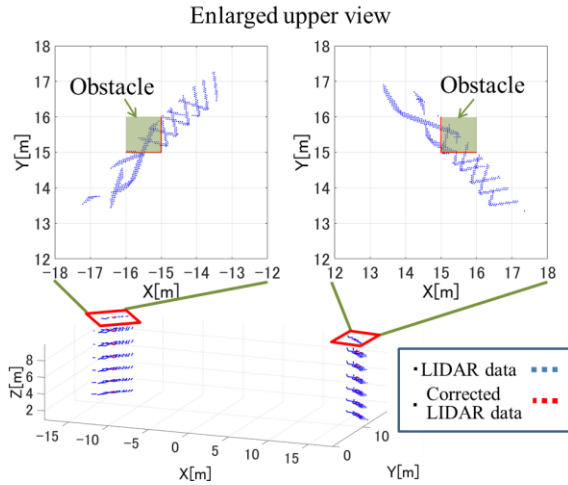


Fig.15 Comparison of proposed spot-based algorithm and conventional scan-based algorithm for 3D rotational oscillated scanning LIDAR

スキャンベース環境マップ生成アルゴリズムを適用した環境マップと比べて、スポットベースの環境マップ生成アルゴリズムを適用した環境マップでは、3つの異なるLIDARすべてにおいて、障害物情報の歪みが補正された。

7. 実機実験

(1) 実験準備

実機実験では、環境マップの歪みがより顕著に発生する移動ロボットの回転運動のみ(その場回転)を検証する。そのため、今回実機実験で使用するセンサは、LIDARとジャイロスコープとする。

実機実験の場合、LIDARとジャイロスコープからデータを取得するタイミングに差が生じる。LIDARがデータを取得してからジャイロスコープがデータを取得するまでの間にも移動ロボットは動いているため、このセンサのデータ取得のタイミングの違いは環境マップの歪みの原因となる。そこで、LIDARの1スキャンの間の移動ロボットの動きだけでなく、LIDARがデータを取得してからジャイロスコープがデータを取得するまでの間の移動ロボットの動きも考慮し、実機実験を行った。

(2) 実験

今回提案した環境マップの補正手法の有効性を、実機を用いて検証した。

移動ロボットの動きの影響を比較するために、シミュレーション時と同様に、一般的に使用されている3つのLIDARを使用する。具体的には、2D LIDARは北陽電気株式会社製のUTM-30LX、複数レーザ式3D LIDARはVelodyne社製のVLP-16、振動式3D LIDARは北陽電気株式会社製のYVT-X002を用いる。LIDARのパラメータは、シミュレーション実験時のTable1と同様である。また、ジャイロスコープには日本航空電子工業株式会社製の

JG-35FDを使用する。

Fig.16に示すように、グローバルx-y-z座標において $[-5, 15, 0]^T$ と $[5, 15, 0]^T$ に、大きさ $[0.57, 0.57, 1.67]^T$ の円柱のランダムとなる障害物を2つ設置する。移動ロボットは右回り1回転、左回り1回転の回転運動(その場回転)する(Table 3)。

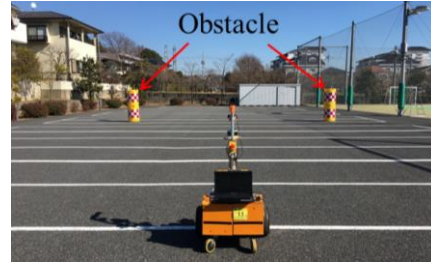


Fig.16 Test environment

Table 3 Parameters for the mobile robot

Moving speed : $v(k)$ [m/s]	0
Initial direction angle : $\varphi(0)$ [rad]	$\pi/2$
Max angular velocity : $\omega(k)$ [rad/s]	2
Translation vector for the LIDAR position gap from the mobile robot position : ${}^L\mathbf{T}_{(x,y,z)}$ [m]	
•2D rotational scanning LIDAR (UTM-30LX)	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0.191 \\ 0.275 \end{bmatrix}$
•3D rotational multiple beams scanning LIDAR (VLP-16)	$\begin{bmatrix} 0 \\ -0.184 \\ 1.113 \end{bmatrix}$
•3D rotational oscillated scanning LIDAR (YVT-X002)	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0.236 \\ 0.48 \end{bmatrix}$

Fig.17 から Fig.19 は、2D LIDARと複数レーザ式3D LIDAR、振動式3D LIDARにスポットベースの環境マップ生成アルゴリズムを適用した結果を示す。また、比較のために、従来のスキャンベース環境マップ生成アルゴリズムを適用した結果も示す。

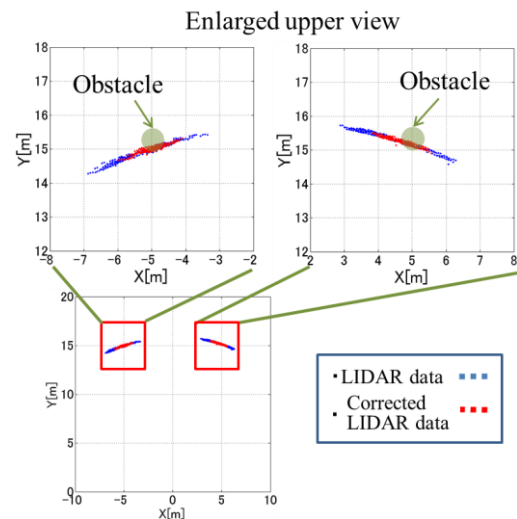


Fig.17 Comparison of proposed spot-based algorithm and conventional scan-based algorithm for 2D rotational scanning LIDAR

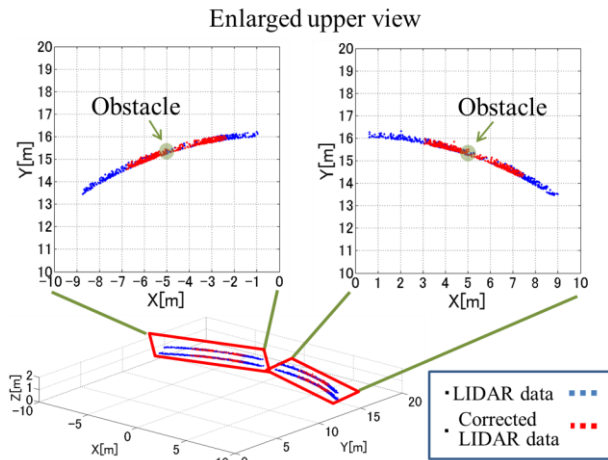


Fig.18 Comparison of proposed spot-based algorithm and conventional scan-based algorithm for 3D rotational multiple beams scanning LIDAR

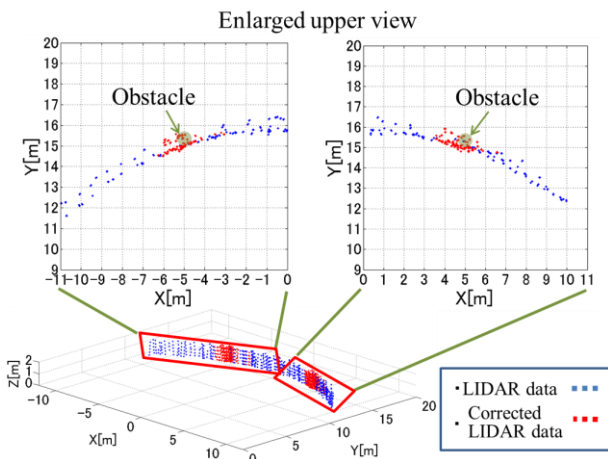


Fig.19 Comparison of proposed spot-based algorithm and conventional scan-based algorithm for 3D rotational oscillated scanning LIDAR

スキャンベース環境マップ生成アルゴリズムを適用した環境マップと比べて、スポットベースの環境マップ生成アルゴリズムを適用した環境マップでは、3つの異なるLIDARすべてにおいて、障害物情報の歪みが軽減された。

8. 結論

本研究では、ロボットの移動を考慮した、スポットベースの環境マップ生成アルゴリズムを提案した。

LIDARの r - θ 距離情報と移動ロボットのオドメトリをLIDARのスポットごとに融合することで、1スキャンの間の移動ロボットの動きを考慮され、歪みの少ない環境マップを取得できることが確認できた。また、実機では、

LIDARがデータを取得してからジャイロスコープがデータを取得するまでの間の移動ロボットの動きも考慮することで、より精度の高い環境マップを取得することができた。

今回提案したスポットベースの環境マップ生成アルゴリズムの有効性は、3つの異なるタイプのLIDARシステムを用いたシミュレーション実験と実機実験を行うことで証明された。

9. 今後の展望

現段階の実機実験では、移動ロボットの並進運動を伴わない回転運動のみの実験にとどまっている。そのため、今後は並進運動を含めた実験も行いたい。

実機実験では、ジャイロスコープやLIDAR等のセンサ誤差により補正アルゴリズム適用後の環境マップにも少なからず歪みが残ってしまった。別の環境マップ補正手法と組み合わせることで、さらに精度の高い環境マップを生成できると考えられるため、さまざまな補正手法の掛け合わせを検討したい。

参考文献

- 1) J. L. Martinez, J. Gonzalez, J. Morales, A. Mandow, A. J. Garcia-Cerezo: Genetic and ICP Laser Point Matching for 2D Mobile Robot Motion Estimation, chapter book in "Studies in computational intelligence" edited by stefano Cagnoni, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- 2) F. Moosmann, C. Stiller: Velodyne SLAM, 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Germany, pp.393-398, 2011
- 3) I. J. Cox, J. B. Kruskal: On the Congruence of Noisy Images to Line Segment Models, In Second International Conference on Computer Vision, pp.252-258, 1988
- 4) B. Wang, S. Cui, L. Zhao, G. Yang, X. Xu: Mobile Robot Map Building Based on Grid Arrangement, 2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, pp.288-291, 2009
- 5) X. Li, S. Jia, W. Cui, J. Fan, J. Sheng: Consistent Map Building by a Mobile Robot Equipped with Stereo Sensor and LRF, 2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE), pp.100-104, 2011